

学校编码: 10384

分类号____密级____

学号: 23120081153177

UDC____

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

具有容错能力的低功耗 8 位微控制器设计研究
Study of Designing 8-bit MCU with Fault Tolerant and
Low-Power

唐 凯

指导教师姓名: 周剑扬 副教授

专 业 名 称: 电路与系统

论文提交日期: 2011 年 月

论文答辩时间: 2011 年 月

学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: ____

评 阅 人: ____

2011 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘 要

随着社会信息化进程的不断加剧，微控制器的应用领域越来越广泛，涉及到工业控制、国防安全、海洋勘测、航空航天等。由此而产生的可靠性、功耗等问题已经成为当今大规模集成电路设计中不可忽视的要素。因此，设计一款兼具容错功能和低功耗的 8 位微处理器显得意义重大。

本文首先系统地研究了 MCS-51 微控制器的基本结构、指令集和指令执行时序，并介绍了 Synopsys 的 DW8051 IP 核，根据 DW8051 IP 核的内部结构、指令执行方式和指令执行状态图，分析了 CPU 的设计方法和过程，为独立开展微控制器的设计打下了基础。

其次，本文分析了单粒子效应的产生环境及其分类，重点介绍了单粒子翻转效应，并探讨了如何使用增强型时空三模冗余技术（EST-TMR）、EDAC 检错纠错码和 Berger 码等技术来消除该效应。接着针对 DW8051 微控制器的内部存储器，采用了汉明码编码的方式进行检错纠错，数据通路中的控制信号则采用了增强型时空三模冗余的方式进行检错纠错；针对 ALU 逻辑与算术运算单元，采取 Berger 码进行检错。在多种容错结构的保护下，本文所改造的 DW8051 微控制器对单粒子翻转的抵御能力得到了增强，保障了微控制器安全可靠的运行。

最后，本文探讨了低功耗设计的发展现状及功耗的分类，并从理论上分析了如何降低静态功耗和动态功耗。在探讨了微控制器中功耗产生的基础上，分析了几种降低微控制器的功耗的方法。对 DW8051 微控制器的设计采用了休眠模式、动态频率管理、和内部寄存器的分页访问设计等几种低功耗的设计方法，有效地降低了系统的功耗。

关键词：MCU；容错；低功耗

Abstract

With the rapid development of informationization of society, microcontrollers have been widely used in industrial control, national defense and security, sea exploration, aviation and aerospace and etc. areas. The resulting reliability, power consumption can not be ignored in today's VLSI design. Therefore, designing a fault tolerance and low-power 8-bit microprocessor seems significant.

Firstly, This article systematic studys the basic structure, instruction set and instruction execution timing of the MCS-51 microcontroller, and then compares several common 8051 IP Core. Based on the structure and commands execution DW8051 IP core, instruction execution state diagram are analyzed, and CPU design methods and processes are presented, forming the foundation of designing micro-controller independently.

Secondly, the paper analyzes the generation of single particle effects and its classification, focusing on single event upset effects, and proposed the enhanced spatial and temporal triple modular redundancy technique (EST-TMR), EDAC error detection and correction codes and Berger codes to eliminate the effect. Then, for the MCS-51 microcontroller's internal memory, using hamming code error detection and correction the way, the data path control signal is enhanced by the spatial and temporal triple modular redundancy approach to error detection and correction; for ALU arithmetic logic unit, Berger coding is used to detect error. Protection in a variety of fault-tolerant structure, the designed MCS-51 microcontroller's capability to prevent the single event upset has been enhanced, ensuring safe and reliable operation of the microcontroller.

Finally, the current development of low-power design and the classification of power are discussed, and the static power and dynamic power consumption are analyzed theoretically. After the study of the MCS-51 microcontroller power generation, methods of reducing the power consumption of the controller are analyzed, and several low-power design methodology are presented, such as adding sleep mode, dynamic frequency management, the bus flipped zero codec design, adder operand

isolation and access to internal registers of the page design, reducing the system power consumption effectively.

Keywords: MCU; Fault Tolerant; Low-Power

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	论文的研究背景	1
1.2	国内外研究现状	2
1.3	研究目的和意义	4
1.4	本文主要贡献和论文结构	5
第 2 章	MCU 系统结构设计方法	6
2.1	MCS-51 微控制器概述	6
2.2	MCS-51 微控制器的内部结构	7
2.2.1	MCS-51 微控制器组成部分	7
2.2.1.1	CPU	8
2.2.1.2	存储器	9
2.2.1.3	I/O 端口	9
2.2.1.4	总线	10
2.2.2	MCS-51 微控制器存储器结构	10
2.3	MCS-51 微控制器的指令系统	11
2.3.1	指令格式	11
2.3.2	指令时序	11
2.3.3	寻址方式和寻址空间	12
2.3.4	指令系统	13
2.4	微控制器 CPU 设计基础	14
2.4.1	CPU 的基本结构和设计方法	14
2.4.1.1	CPU 的基本结构	14
2.4.1.2	CPU 的设计方法	15
2.4.1.3	数据通路的建立	18
2.4.2	ALU 模块的设计	19
2.4.2.1	算术运算模块的实现	20
2.4.2.2	十进制调整电路	22

2.4.2.3	布尔运算实现	23
2.4.3	控制模块的设计	23
2.4.3.1	计数器	24
2.4.3.2	译码器	24
2.4.3.3	逻辑表达	24
2.5	本章小结	25
第 3 章	容错结构分析与设计	27
3.1	单粒子效应理论分析	27
3.1.1	单粒子效应产生的环境	27
3.1.2	单粒子效应的类型及特点	29
3.1.3	单粒子翻转的产生机理	30
3.1.4	单粒子翻转对微处理器的影响	30
3.1.4.1	单粒子翻转对时序逻辑电路的影响	30
3.1.4.2	单粒子翻转对组合逻辑电路的影响	31
3.2	单粒子翻转 (SEU) 容错电路设计	32
3.2.1	增强型时空三模冗余技术	32
3.2.1.1	时空三模冗余电路的结构分析	33
3.2.1.2	增强型时空三模冗余电路	34
3.2.2	EDAC 检错纠错码	36
3.2.3	Berger 码	38
3.3	针对微控制器的容错处理	40
3.3.1	存储器容错保护设计	40
3.3.2	数据通路中系统控制信号的容错保护设计	42
3.3.3	ALU 单元的容错保护设计	45
3.4	本章小结	47
第 4 章	微控制器的低功耗设计研究	49
4.1	低功耗技术研究	49
4.1.1	低功耗的发展现状	49
4.1.2	功耗的分类	50

4.1.2.1	静态功耗分析	50
4.1.2.2	动态功耗分析	50
4.2	静态功耗优化技术	53
4.3	动态功耗不同设计时期的功耗优化	54
4.3.1	系统级低功耗设计	56
4.3.2	行为级低功耗设计	56
4.3.3	RTL 级低功耗设计	57
4.3.4	逻辑级低功耗设计	61
4.3.5	物理级低功耗设计	62
4.4	微控制器低功耗设计	63
4.4.1	休眠模式	63
4.4.2	动态频率管理	65
4.4.3	存储器分页管理	68
4.5	本章小结	69
第 5 章	总结与展望	71
5.1	本文完成的设计工作	71
5.2	设计中的创新点	72
5.3	下一步工作展望	72
参考文献		73
致 谢		76
攻读硕士学位期间发表的论文		77

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Research Background.....	1
1.2	Research Status in Domestic and Abroad	2
1.3	Research Purposes and Meaning.....	4
1.4	Work and Organization of the Thesis	5
Chapter 2	The Structure Design of MCU	6
2.1	Brief Description of MCS-51.....	6
2.2	Internal Structure of MCS-51.....	7
2.2.1	Internal Structure of MCS-51	7
2.2.1.1	CPU	8
2.2.1.2	Memory	9
2.2.1.3	I/O Port	9
2.2.1.4	BUS	10
2.2.2	Memory Structure of MCS-51.....	10
2.3	Instruction System of MCS-51.....	11
2.3.1	Instruction Format	11
2.3.2	Instruction Timing	11
2.3.3	Addressing Modes and Addressing Space.....	12
2.3.4	Instruction System	13
2.4	CPU Design of MCS-51	14
2.4.1	The Basic Structure and Design Method of CPU.....	14
2.4.1.1	The Basic Structure of CPU	14
2.4.1.2	Design Method of CPU	15
2.4.1.3	Design of data path.....	18
2.4.2	Design of ALU Module	19
2.4.2.1	Implementation of Arithmetic Module.....	20
2.4.2.2	Decimal Adjusting Circuit.....	22
2.4.2.3	Implementation of Boolean Operations	23

2.4.3	Design of Control Module.....	23
2.4.3.1	Counter	24
2.4.3.2	Decoder	24
2.4.3.3	Logical expression.....	24
2.5	Summary.....	25
Chapter 3	Structural Analysis and Design of Fault Tolerant.....	27
3.1	Theoretical Analysis of Single Event Effects	27
3.1.1	The Environment of Single Event Effects.....	27
3.1.2	Classification and Characteristics of Single Event Effects	29
3.1.3	The Mechanism of SEU	30
3.1.4	Effects of SEU on Microprocessor.....	30
3.1.4.1	Effects of SEU on Sequential Circuits	30
3.1.4.2	Effects of SEU on Combinational Circuits	31
3.2	Design of SEU Fault-Tolerant Circuit.....	32
3.2.1	Enhanced ST-TMR.....	32
3.2.1.1	Structural Analysis of ST-TMR.....	33
3.2.1.2	Enhanced ST-TMR Circuit.....	34
3.2.2	EDAC	36
3.2.3	Berger Code.....	38
3.3	Fault-Tolerant Design of MCS-51 Microcontroller	40
3.3.1	Fault-Tolerant Design of Memory.....	40
3.3.2	Fault-Tolerant Design of Control Signals of Data Path.....	42
3.3.3	Fault-Tolerant Design of ALU	45
3.4	Summary.....	47
Chapter 4	Low Power Design of MCS-51 Microcontroller.....	49
4.1	Low Power Technology	49
4.1.1	Research Status of Low Power.....	49
4.1.2	Classification of Power Consumption.....	50
4.1.2.1	Static Power Analysis	50

4.1.2.2	Dynamic Power Analysis	50
4.2	Static Power Optimization	53
4.3	Dynamic Power Optimization.....	54
4.3.1	System-Level Low Power Design	56
4.3.2	Behavioral-Level Low Power Design	56
4.3.3	RTL-Level Low Power Design	57
4.3.4	Logic-Level Low Power Design	61
4.3.5	Physical-Level Low Power Design	62
4.4	Low Power Design of MCU.....	63
4.4.1	Sleep Mode	63
4.4.2	Dynamic Frequency Management Module	65
4.4.3	Memory Block Management.....	68
4.5	Summary.....	69
Chapter 5	Summary and Future Work.....	71
5.1	The Completed Work	71
5.2	Design Innovation	72
5.3	Future Work	72
References		73
Acknowledgements		76
Published Paper during Pursuing Master Degree		77

厦门大学博硕士论文摘要库

第1章 绪论

1.1 论文的研究背景

微控制器简称 MCU，它将 ROM、RAM、CPU、I/O 集成在一个芯片当中，可以用于不同场合的控制。微控制器经过不断的研究开发，历经 4 位，8 位，到现在的 32 位甚至 64 位，其产品线已经非常成熟，应用范围也极其广泛。8 位微控制器的出现是近代计算机技术发展的里程碑事件，它的诞生标志着计算机正式形成了通用计算机系统和嵌入式计算机系统两大分支。单片机的单芯片的微小体积和极低的成本，可广泛嵌入到各种应用设备当中。由于 8 位微控制器的特点，其在工业自动化控制、智能仪器仪表、数据采集系统、通讯、通用测控模块等领域中，已经得到了日益广泛的应用，并扮演极其重要的角色，具有广阔的应用前景。

微控制器的使用场所逐渐从条件优越的室内转到工厂、野外、海上、天上、宇宙等较为复杂的环境，恶劣的环境导致控制器及其应用系统出错的概率增加，这也使得其可靠性面临着严峻的考验。同时随着半导体技术的迅猛发展，半导体器件的集成度不断提高，器件的特征尺寸越来越小，工作电压越来越小，相应地，临界电荷越来越小，各种外界影响使得处理器对于串扰、接地反弹、电磁干扰以及辐射等各种噪声干扰变得更加敏感，并可能引发错误的操作，大大降低了处理器的可靠性。通过查阅文献，我们知道计算机系统中 80%-90% 的失效都是由于瞬态故障引起的^[1]，这表明瞬态故障是引起计算机失效的主要原因，即使是系统中一个状态位发送错误的改变，都有可能造成整个系统致命的错误。提高微处理器可靠性最根本的方法就是使用特殊的 VLSI 设计工艺，但是特殊工艺的实现成本往往较高。所以在目前微处理可靠性设计中，急需一种有效的设计技术，在体系结构级对处理器进行改进，从而在增强微处理器可靠性的同时，降低可靠性设计的成本。

集成电路进入深亚微米工艺后，单一硅片上集成的晶体管数量将超过 10 亿个以上。这使得功耗问题成为大规模集成电路设计领域中一个不得不考虑的问题。便携式设备基本都依靠电池进行供电，但是电池的发展速度相对于集成电路

的功耗增长速度差距太大, 30 年中, 电池的容量仅仅增加了 4 倍^[2]。功耗的增加同时带来了散热的问题, 集成电路消耗的能量绝大部分都是以热量形式散发出来, 功耗增大的同时, 集成电路所散发出的热量随之提高, 则集成电路的封装和散热成本显著提高, 或者增加风扇散热, 或者改进封装形式, 成本均会大幅提高。因此采用低功耗的技术可以有效的降低封装和散热成本。同时, 功耗的增加也会带来电路可靠性的问题, 功耗密度的增加, 将引起芯片局部温度升高, 随之引发的电迁移、热载流子等一系列问题都会使器件可靠性降低, 因此, 功耗已经成为集成电路设计当中一个相当重要的参数。

1.2 国内外研究现状

我国改革开放以来, 经济迅猛发展, 科技水平大幅提高, 但是一些重要的微控制器产品基本都是从国外引进, 我们在计算机和信息技术的基础方面还是十分薄弱的。

现如今, 我国微控制器市场已有相当的规模, 但在世界微控制器市场中所占比例甚小, 本土的微控制器产业还很薄弱, 只在中低档市场尚可一争。从 MCU 生产方面来说, 我国 MCU 产品市场绝大部分由国外生产厂商控制。国内厂商只能从事中低档产品的生产, 且规模偏小。近几年, 随着 MCU 市场的扩大, 进入我国的国外大公司很多, 除早已占领相当市场的 Intel 和 Motorola 外, TEMIC、LG、TI、FUJITU、Microchip 和 Ski 公司相继进入。但是, 由于我国国内集成电路产业长期滞后于整机产业的发展, 因此国内企业较少有涉足生产 MCU 产品的, 即使有些设计公司开发了一些 MCU 的产品, 也存在品种规格不全, 软硬件开发工具跟不上, 可供服务的产品方式少等问题。因此, 除个别领域外, 国内生产的 MCU 产品基本上没有投入批量生产, 也谈不上占有市场份额。我国生产 MCU 的企业有厦门联创微电子股份有限公司、杭州士兰微电子股份有限公司、上海新茂半导体有限公司等。另外信息产业部下属的一些研究所以及学校的科研部门也有从事 MCU 的设计和少量生产工作。

在 MCU 容错方面, 国内国外的工业界都很少有专门从事容错处理器研发的厂家, 早期在我国更是一直处于空白状态, 在 80 年代中期, 随着我国卫星上出现了单粒子效应故障, 才从不同的侧面开展了针对微控制器的容错研究, 但是多

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库